Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎，丁琪琪，金苗，薛滨，张路，姚书春，王兆德，卢少勇，赵中华

PAHs VOCs PCBs HMs PAEs OCPs ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年10月
第42卷 第 10 期
Vol.42 No.10

环 境 科 学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 42 卷 第 10 期
2021 年 10 月 15 日

目 次

$PM_{2.5}$化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 …… 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷(4575)
汾渭平原 $PM_{2.5}$空间分布的地形效应 …… 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦(4582)
华中地区冬季灰霾天气下 $PM_{2.5}$中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例 …… 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽(4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 …… 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹(4602)
成都市春季 O_3 污染特征及关键前体物识别 …… 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政(4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O_3 来源特征 …… 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利(4621)
廊坊开发区 8~9 月 O_3 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 …… 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰(4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响 …… 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启(4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 …… 徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬(4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 …… 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓婉(4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响 …… 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯(4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 …… 杨柳, 何晴, 盛重义(4678)
长江流域主要干/支流水化学特征及外源酸的影响 …… 王琪, 于奭, 蒋萍萍, 孙平安(4687)
土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 …… 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海(4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征 …… 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡晅, 孔飞鹤, 任源鑫(4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价 …… 任丙南, 耿静(4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 …… 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华(4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 …… 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆(4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 …… 张凯, 辛蕊, 李贶家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍(4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 …… 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺(4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 …… 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊(4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度 …… 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰(4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co^{2+} 均相催化氧化有机物的影响因素与机制 …… 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚(4789)
磁性生物炭负载 α-MnO_2 活化过一硫酸盐降解2,2′,4,4′-四溴联苯醚 …… 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩(4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制 …… 张崇淼, 杨昊明, 王真(4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 …… 王光泽, 曾薇, 李帅帅(4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 …… 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰(4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 …… 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝骁, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔(4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 …… 杨思航, 秦泽生, 梁漫春(4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 …… 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志(4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 …… 周锋, 刘勇弟, 厉巍(4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 …… 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥(4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析 …… 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿鋆, 王二龙, 李姜瑶(4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 …… 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏(4889)
广西都安县典型水田硒地球化学特征及影响因素 …… 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪(4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砧木镉积累和镉伤害 …… 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强(4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险 …… 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶(4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索 …… 苗荪, 陈磊, 左剑恶(4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 …… 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英(4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 …… 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜(4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 …… 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军(4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 *nirS* 型反硝化细菌群落特征分析 …… 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉(4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构 …… 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强(4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 …… 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清(4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 …… 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇(4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 …… 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳(4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 …… 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍(5010)
水稻产量、稻田 CH_4 和 N_2O 排放对长期大气 CO_2 浓度升高的响应 … 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华(5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 …… 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋(5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子 …… 李宇, 周德成, 闫章美(5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 …… 张万众, 张彭义(5046)
《环境科学》征订启事(4814) 《环境科学》征稿简则(4871) 信息(4907, 5009, 5029)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第10期 2021年10月
Vol.42,No.10 Oct.,2021

汾渭平原 $PM_{2.5}$ 空间分布的地形效应

黄小刚[1,2,3]，赵景波[2,3*]，孙从建[1]，汤慧玲[1]，梁旭琦[1]

(1. 山西师范大学地理科学学院，临汾 041004；2. 中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室，西安 710061；3. 陕西师范大学地理科学与旅游学院，西安 710119)

摘要：地形不仅通过制约人口和产业布局作用于污染物排放的空间分布，而且对 $PM_{2.5}$ 的形成、传输、累积、扩散和沉降有深刻影响，是 $PM_{2.5}$ 空间分布的重要影响因素，盆地地区表现尤为显著. 本文基于栅格数据，利用均值变点法、回归分析、地理探测器和双变量空间自相关分析等方法，从自然和人为因素两方面选取指标，探讨汾渭平原 $PM_{2.5}$ 浓度分布的地形效应及影响机制. 结果表明：①汾渭平原地形起伏度总体呈中部低、四周高分布，与海拔分布基本一致. ②$PM_{2.5}$ 分布格局与地形起伏度相反，总体呈中部高、四周低，且随地形起伏度的升高呈对数关系递减. ③地理探测器分析结果显示，汾渭平原 $PM_{2.5}$ 分布格局主要由人口、GDP 和能源消费等人为因素决定，气象和植被等自然因素对 $PM_{2.5}$ 分布也有一定的调节作用. ④地形对人为和自然因素均有显著影响，随着地形起伏度的增加，人口、GDP 和能源消费而呈幂函数关系递减，气温呈线性递减，降水量、相对湿度和风速呈线性递增，植被指数呈对数关系递增.

关键词：汾渭平原；$PM_{2.5}$ 浓度；空间分布；地形起伏度；地形效应

中图分类号：X513 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2021)10-4582-11 **DOI**：10.13227/j.hjkx.202102024

Orographic Influences on the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ on the Fen-Wei Plain

HUANG Xiao-gang[1,2,3], ZHAO Jing-bo[2,3*], SUN Cong-jian[1], TANG Hui-ling[1], LIANG Xu-qi[1]

(1. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China; 2. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 3. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Topography not only has an effect on the spatial distribution of pollutants by restricting populations and industrial activities, but also affects the formation, transmission, accumulation, diffusion, and sedimentation of $PM_{2.5}$. Topography is, therefore, an essential variable for understanding the spatial distribution of $PM_{2.5}$, especially in basin areas. Based on gridded data and both natural and human indexes, this paper examines orographic effects on the distribution of $PM_{2.5}$ on the Fen-Wei Plain based on the change point method, regression, the geographical detector method, and bivariate spatial autocorrelation. The results indicate that: ① The relief amplitude of the plain is generally lower in its central part than at its edge, which is similar to the attitudinal distribution in this region; ② The distribution of $PM_{2.5}$ is negatively related to relief amplitude, with high concentrations in central area and lower concentrations at the edge; ③ Based on the geographical detector analysis, $PM_{2.5}$ patterns in this region are shaped by human factors including population, gross domestic product (GDP), and energy consumption, as well as natural factors including meteorological conditions and vegetation; and ④ Topography has a significant effect on both human and natural factors; an increase of relief amplitude is associated with a decrease in population, GDP, and energy consumption based on power function. Accordingly, temperature goes down linearly; precipitation, relative moisture, and wind speed increase linearly; and the vegetation index increases based on a logarithmic function.

Key words: Fen-Wei Plain; concentration of $PM_{2.5}$; spatial distribution; relief amplitude; orographic influence

$PM_{2.5}$ 主要来源于人为排放[1]，包括人为直接排放造成的一次源和 VOCs、NO_x、SO_2、NH_3 等气态污染物经过复杂化学反应形成的二次源[2]，气象、植被和地形等自然因素则对 $PM_{2.5}$ 的形成、传输、累积、扩散和沉降有重要影响[3~5]，因此局地 $PM_{2.5}$ 浓度是人为因素和自然因素综合作用的结果[6]. 为定量化识别各因素对 $PM_{2.5}$ 的影响，学者们利用广义可加模型[7]、地理探测器[8]、地理加权回归分析[9]、灰色关联模型[10]和空间计量模型[1,11]等方法，从不同时空尺度进行了广泛的研究[6]. 结果发现，地形因素较为特殊，对人为因素和自然因素都有重要影响[7]，深刻改变着 $PM_{2.5}$ 的空间分布格局. 人为活动方面，地形是人口分布和经济发展的重要限制因子[12]，人类活动主要集中在地势低平的地区[13]，因而污染物排放通常具有平原指向性. 自然条件方面，高大地形不仅能阻挡气流流通，地形起伏大的区域还易形成特殊的风温场和湍流场，对 $PM_{2.5}$ 的传输、累积、扩散和沉降均有显著影响[3,14~17]，例如我国汾渭平原[11]、兰州[16]和四川盆地[17] $PM_{2.5}$ 污染较严重就与地形因素有关，复杂地形上的大气扩散规律已成为空气污染气象学的重要研究课题[16]. 目前关于地形对 $PM_{2.5}$ 影响的研究主要基于两种方法：一是将其纳入 $PM_{2.5}$ 影响因素综合评价指标体系，采用统计模型分析各指标与 $PM_{2.5}$ 的统计学关系[1,7,11]；二是利用模式模拟地形对 $PM_{2.5}$ 扩散

收稿日期：2021-02-03；**修订日期**：2021-03-26

基金项目：中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室项目(KLACP1904)；山西哲学社会科学规划课题项目(2019B202)；山西师范大学研究生双语课程建设计划项目(YJSSY201904)

作者简介：黄小刚(1978~)，男，博士研究生，副教授，主要研究方向为生态环境评价与治理，E-mail：huangxg@sxnu.edu.cn

* 通信作者，E-mail：zhaojb@snnu.edu.cn

的影响[15,16]. 前者受限于社会经济数据来源,多以行政区划为评价单元,忽略了区域内部的差异性. 许多地形指标(如地形起伏度)具有尺度依赖性[12],评价单元过大易忽略其细部特征,难以满足大气污染治理精细化管理的要求. 后者主要着眼于地形对污染物扩散的模拟,较少涉及人为因素. 因此,基于高分辨率地形数据,研究地形对 $PM_{2.5}$ 的影响,并从自然和人为因素两方面去探索其影响机制,对全面认识 $PM_{2.5}$ 分布的地形效应具有重要意义.

汾渭平原主体包括汾河平原和渭河平原,由汾渭地堑经汾、渭二河冲积而成,是典型的盆地地形. 近年来,随着经济的快速发展,汾渭平原 $PM_{2.5}$ 污染严重,根据"打赢蓝天保卫战三年行动计划", 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度仅次于京津冀地区,成为我国 $PM_{2.5}$ 浓度第二高区域,被列为全国大气污染重点防控区. 有研究发现,汾渭平原 $PM_{2.5}$ 污染问题不仅与其自然环境脆弱、产业结构偏重、运输结构和能源消费结构不合理有关[11],其相对封闭的盆地地形导致 $PM_{2.5}$ 容易聚集和不易扩散也是重要原因[18,19]. 为全面认识地形对汾渭平原 $PM_{2.5}$ 分布的影响,本文收集了汾渭平原的地形、植被、气象、人口、经济和 $PM_{2.5}$ 遥感反演等数据,利用地统计学等方法,分析汾渭平原 $PM_{2.5}$ 浓度分布的地形效应及影响机制,以期为汾渭平原 $PM_{2.5}$ 防控政策的制定提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　数据来源与处理

高程数据(DEM)来自航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM,http://srtm.csi.cgiar.org/),原始数据分辨率为 90 m. 由于空气质量实时监测站点较少且集中在城区,缺乏空间代表性,因此 $PM_{2.5}$ 浓度采用遥感反演数据,数据来源于大气成分分析组织(ACAG,http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140),有学者利用地面站点实测数据对该数据集进行过精度评估,两者相关系数达到 0.81[20],精度较高,已成功应用于我国不同区域 $PM_{2.5}$ 的研究[6,7,21]. 气象数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/),原始数据已经过严格的质量控制,数据可靠. 植被状况采用归一化植被指数(NDVI)表征,原始数据来自美国国家航空航天局(NASA,http://modis.gsfc.nasa.gov/). 人口和 GDP 栅格数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/). 由于能源消费的栅格数据较难获取,有研究表明能源消费与夜间灯光数据显著相关[22],因此能源消费指数采用夜间灯光数据表征,原始数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA,https://www.ngdc.noaa.gov),分析前采用曹子阳等[23]的研究方法进行了处理. 为减小随机误差的影响,以上数据采用 2015 ~ 2017 年的平均值,因人口和 GDP 数据无 2016 年和 2017 年的数据,直接采用 2015 年表征. 所获自然和人为影响因素的空间分布如图 1 所示.

为将上述多源数据融合,首先,利用 Anusplin 4.2 将气象数据插值为栅格;其次,通过均值变点法求取地形起伏度的最佳统计单元后,利用 ArcGIS 10.2 生成对应的规则网格(Fishnet);第三,通过 ArcGIS 的分区统计功能获取最终评价指标值.

1.2　研究方法

1.2.1　地形起伏度

地形地伏度是反映地形特征的常用指标,一般指某一区域内最高海拔点和最低海拔点的高差,但在不同领域由于应用目的不同,提取方法也存在差异. 本文借鉴柏中强等[24]在分析人口分布影响因素时提出的提取方法,以综合反映地形对人类活动的影响. 具体公式如下[24]:

$$\mathrm{RDLS} = \frac{\mathrm{ALT}}{1\,000} + \frac{(H_{\max} - H_{\min})(1 - P_{\mathrm{A}})}{500} \quad (1)$$

式中,RDLS 指某一区域的地形起伏度, ALT 指平均海拔,$H_{\max}$ 和 $H_{\min}$ 分别指最高海拔和最低海拔,P_{A} 指平地面积比例(坡度≤5°).

显然,地形起伏度具有尺度依赖性,随统计单元大小的变化而不同. 根据地貌发育理论,一种地貌类型存在使最大高差达到相对稳定的最佳分析窗口[25]. 为证实最佳分析窗口的存在,使用 ArcGIS Focal Statistics 分析功能,依次计算窗口为 2×2、3×3、…、40×40 的平均地形起伏度,结果发现各窗口的平均最大高差随窗口面积的增大先快速上升后趋于平缓,二者呈近似对数变化关系[图 2(a)]. 在窗口面积为 1 ~ 2 km^2 间存在平均最大高差由陡变缓的点,这个点称之为变点,所对应的面积即为最佳统计窗口面积. 本文使用均值变点法求解变点[26].

(1)将不同窗口最大高差平均值与对应窗口面积相除,得到不同窗口下单位面积最大高差 T_w,再将其取自然对数,得到数列 $\{X_w\}$,即:

$$X_w = \ln T_w \quad (2)$$

式中,w 为窗口大小,取值为 2, 3,…, 40.

(2)计算数列 $\{X_w\}$ 的离差平方和 S:

$$S = \sum_{t=1}^{39} (X_t - \bar{X})^2 \quad (3)$$

式中,$\bar{X}$ 为算术平均值.

(3)令 i = 2, 3,…, 38,对每个 i 将 X_w 分成 2 段:$X_1, X_2, \cdots, X_{i-1}$ 和 $X_i, X_{i+1}, \cdots, X_{39}$. 计算每段样

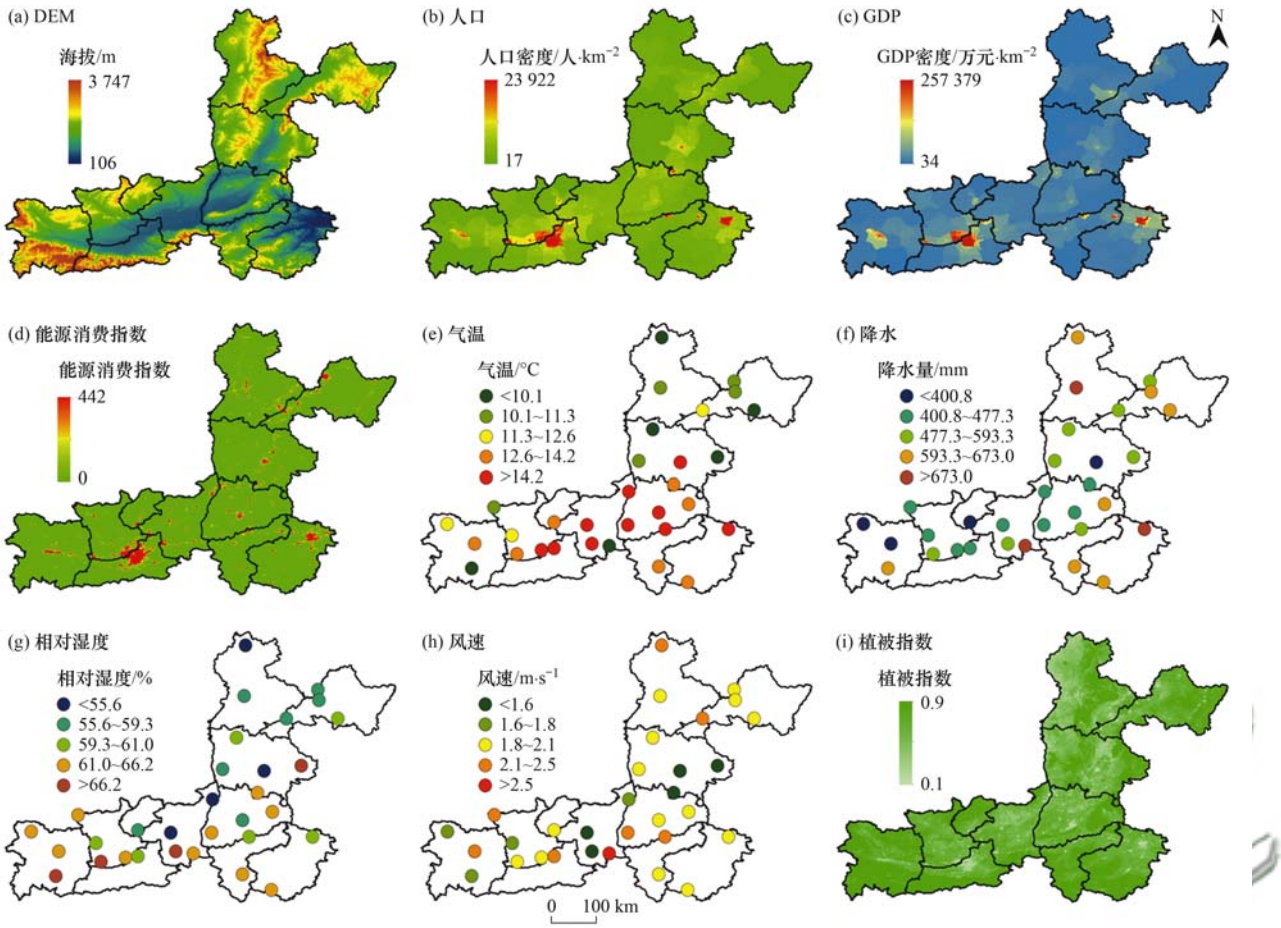


图 1 自然和人为影响因素的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of natural and human factors

本的算术平均值$\overline{X}_{i1}$和$\overline{X}_{i2}$及统计量 S_i：

$$S_i = \sum_{t=1}^{i-1}(X_t - \overline{X}_{i1})^2 + \sum_{t=i}^{39}(X_t - \overline{X}_{i2})^2 \quad (4)$$

(4)计算 S 与 S_i 的差值，差值最大时 i 所对应的窗口即为最佳统计窗口大小. 图 2(b)为 S 和 S_i 差值序列变化曲线，在第 15 个点(即 $i=16$)时差值最大，所对应的窗口大小为 17 像元，即1 530 m × 1 530 m的网格大小.

1.2.2 空间自相关分析

空间自相关是指空间事物在空间分布上的相互依赖关系，是度量空间事物集聚程度的一种常用空间统计方法，可分为全局空间自相关分析和局部空间自相关分析. 其中，全局空间自相关分析用于分析空间事物在总的空间范围内的空间依赖程度，常用全局 Moran's I 来度量，计算公式如下[27]：

$$I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}(X_i - \overline{X})(X_j - \overline{X})}{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}\right)\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})} \quad (5)$$

式中，n 为栅格总数；X_i 和 X_j 分别为栅格 i 和 j 的

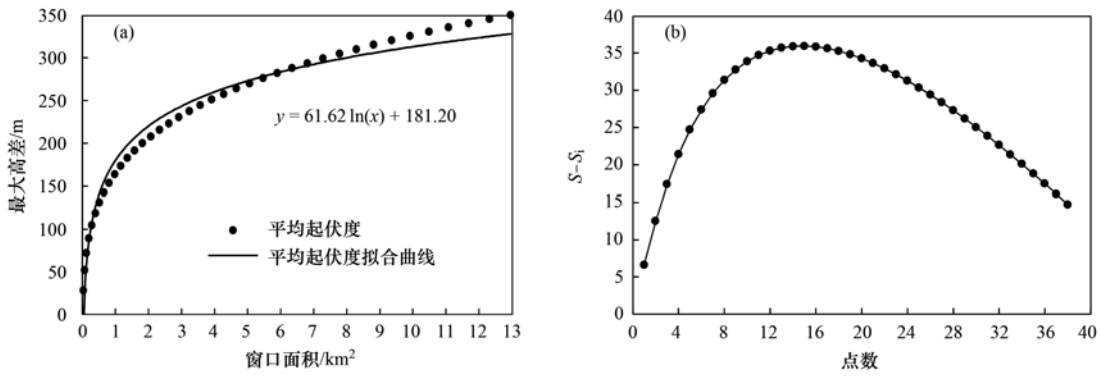


图 2 地形起伏度与统计窗口大小关系及 $S-S_i$ 变化曲线

Fig. 2 Relationship between the average relief degree and the window area, and variation curve of the difference between S and S_i

$PM_{2.5}$ 浓度；$\bar{X}$ 为 $PM_{2.5}$ 平均浓度；$\boldsymbol{W}_{ij}$ 为空间权重矩阵. Moran's I 的值域为[-1,1],大于 0 表示正相关,$PM_{2.5}$ 浓度相似的栅格趋于集聚分布；小于 0 表示负相关,$PM_{2.5}$ 浓度相似的栅格趋于离散分布；等于 0 表示不相关,$PM_{2.5}$ 浓度呈随机分布状态.

局部空间自相关分析用于揭示空间事物与其邻近的空间事物间的相似性或差异性,常用局部 Moran's I 来测度,计算公式如下[28]：

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^{n} \boldsymbol{W}_{ij} Z_j \tag{6}$$

$$Z_i = \frac{n(X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2} \tag{7}$$

$$Z_j = \frac{n(X_j - \bar{X})}{\sum_{j=1}^{n} (X_j - \bar{X})^2} \tag{8}$$

式中,I_i 为局部 Moran's I；Z_i 和 Z_j 分别为 $PM_{2.5}$ 的标准化形式,其余变量含义同公式(2). I_i 大于 0 表示局部 $PM_{2.5}$ 浓度相似栅格趋于集聚,小于 0 表示趋于离散分布.

Anselin 等[29]在 Moran's I 的基础上拓展了双变量全局和局部自相关分析,本文利用该方法来刻画地形起伏度与自然和人为因素间的空间自相关性,以确定地形起伏度对自然和人为因素的影响. 计算公式如下[29]：

$$I_{lm}^{p} = Z_l^{p} \sum_{q=1}^{n} \boldsymbol{W}_{pq} Z_m^{q} \tag{9}$$

$$Z_l^{p} = \frac{Y_l^{p} - \bar{X}_l}{\sigma_l} \tag{10}$$

$$Z_m^{q} = \frac{Y_m^{q} - \bar{X}_m}{\sigma_m} \tag{11}$$

式中,I_{lm}^{p} 是双变量自相关系数；Z_l^{p} 和 Z_m^{q} 为观测属性的标准化形式；Y_l^{p} 是栅格 p 对应属性 l 的值；Y_m^{q} 是栅格 q 对应属性 m 的值；$\bar{X}_l$ 和 $\bar{X}_m$ 分别为属性 l 和属性 m 的平均值；σ_l 和 σ_m 分别为属性 l 和属性 m 的方差；$\boldsymbol{W}_{pq}$ 为栅格 p 和 q 间的空间邻接矩阵. 空间自相关分析借助 GeoDa 1.14.0 进行,结果采用局部空间关联指数图(LISA)展示,评价结果包括高高集聚、低高集聚、低低集聚和高低集聚. 空间自相关分析的显著性均采用 Z 检验.

1.2.3　地理探测器

地理探测器的核心思想是：若解释变量对被解释变量有重要影响,则两者在空间分布上应具有相似性[30]. 地理探测器包括 4 个探测器,其中因子探测器能探测被解释变量(Y)的空间分异性,以及解释变量(X)在多大程度上解释了 Y 的空间分异. 本文使用因子探测器来探测人为因素和自然因素对汾渭平原 $PM_{2.5}$ 空间分布的影响,表达式为[30]：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2 \tag{12}$$

式中,q 为解释变量的影响力,L 为变量 Y 或因子 X 的分层(分类或分区),N_h 和 N 分别为层和整体的样本数,σ_h^2 和 σ^2 分别指层 h 和整体的方差. q 的值域为[0,1],q 越大,说明该解释变量对 $PM_{2.5}$ 空间分布的影响力越大. 影响方向采用相关分析表示,正相关表示正向影响,记为“ + ”,负相关表示负向影响,记为“ - ”.

2　结果与讨论

2.1　汾渭平原地形分布特征

汾渭平原地形起伏度具有中部低、四周高的空间分布特征[图 3(a)],中部为河流冲积平原,地势低平,地形起伏度相对较小,平原四周被丘陵和山地环绕,地形起伏度较大,属典型的盆地地形. 由图 3(b)可以看出,汾渭平原地形起伏度变化范围为 0.1 ~ 5.2,平均值为 1.4,面积分布对应的地形起伏度有两个峰值区间：0.1 ~ 0.8 和 0.8 ~ 2.2. 0.1 ~ 0.8 为低起伏度地区,主要为冲积平原,地形最平坦. 平

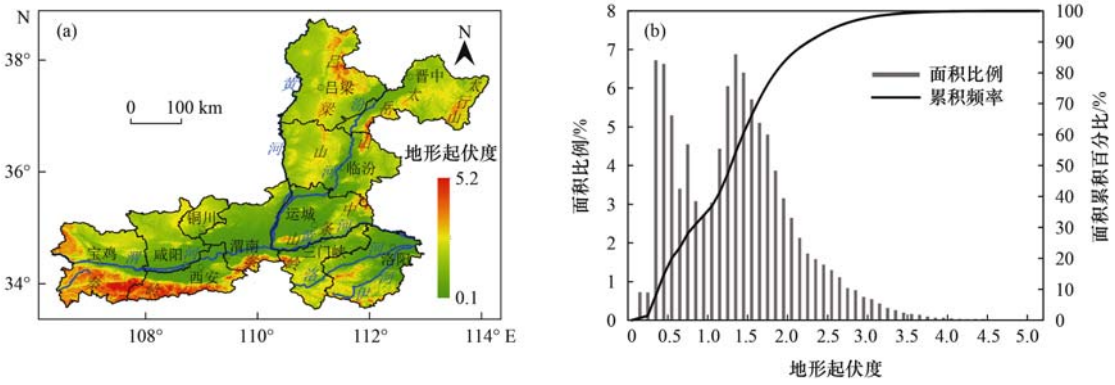


图 3　汾渭平原地形起伏度空间分布及面积比例和累积频率

Fig. 3　RDLS and its distribution ratio and accumulative frequency for the Fen-Wei Plain

均高差 52 m,平地面积(坡度小于 5°)比例在 71.3%~98.5%之间,平均为 86.0%.主要分布在汾河、渭河及伊河、洛河的沿岸,约占汾渭平原总面积的 28.1%.地形起伏度 0.8~2.2 为中起伏度地区,多属黄土高原丘陵和山地.平均高差 224 m,平地面积比例在 3.0%~54.3%之间,平均为 15.8%.主要分布在汾河平原的东部和西部、渭河平原北部及洛阳盆地西部,约占汾渭平原总面积的 60.0%.地形起伏度大于 2.2 的为高起伏度地区,多为高大山脉,面积比例较小,且随地形起伏度的增加而快速减小.平均高差 499 m,平地面积比例多小于 3%,平均为 1.6%.主要分布在秦岭、吕梁山、太岳山和太行山等高大山系,约占汾渭平原总面积的 11.9%.

地形起伏度与海拔高度有显著的正相关关系,线性拟合度达 0.884(图 4),说明地形起伏度低的地区海拔一般也较低,地形起伏度高的地区海拔一般较高.图 4 统计显示,汾渭平原海拔 <600 m 的区域面积为 37 782.1 km^2,占汾渭平原总面积的 24.8%,其地形起伏度在 0.1~1.6 之间,平均为 0.5.其中 92.1%的区域为低起伏度地区(地形起伏度为 0.1~0.8),7.9%为中起伏度地区(地形起伏度为 0.8~2.2),无高起伏度地区出现(地形起伏度 >2.2).海拔为 600~1 200 m 的区域面积为 67 813.5 km^2,占汾渭平原总面积的 44.4%,其地形起伏度在 0.6~3.0 之间,平均为 1.3.其中 11.8%为低起伏度地区,87.1%为中起伏度地区,1.1%高起伏度地区.海拔为 1200~1 800 m 的区域面积为 40 418.0 km^2,占汾渭平原总面积的 26.5%,其地形起伏度在 1.2~3.7 之间,平均为 2.0.其中 78.3%为中起伏度地区,28.7%高起伏度地区,无低起伏度地区出现.海拔 >1 800 m 的区域面积为6 577.9 km^2,占汾渭平原总面积的 4.3%,其地形起伏度在 2.1~5.2 之间,平均为 3.0.其中 0.2%为中起伏度地区,99.8%高起伏度地区,无低起伏度地区出现.可见,随着海拔高度的上升,低起伏度地区面积比例逐渐减小直至消失,高起伏度地区面积比例则逐渐增大,地表破碎程度增加.

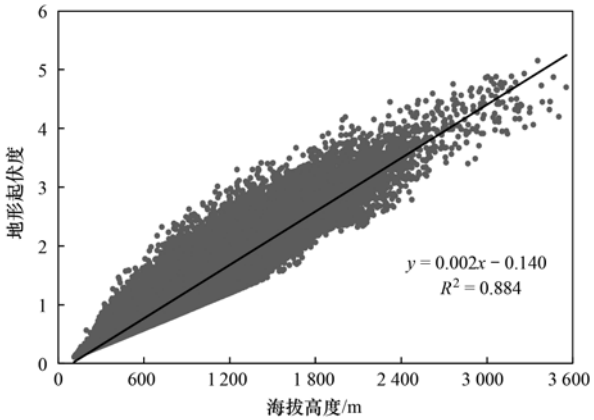


图 4 汾渭平原地形起伏度随海拔高度的变化

Fig. 4 Variation in RDLS with altitude on the Fen-Wei Plain

2.2 $PM_{2.5}$浓度分布特征

汾渭平原 $PM_{2.5}$浓度总体具有中部高、四周低的特征,由汾河和渭河的冲积平原以及洛阳盆地向四周丘陵和山地逐渐递减[图 5(a)].2015~2017 年汾渭平原 $PM_{2.5}$平均浓度变化范围为 26~84 μg·m^{-3},平均为 44 μg·m^{-3},均已超过环境空气质量标准(GB 3095-2012)规定的一级浓度限值(15 μg·m^{-3}).其中,低于二级限值(35 μg·m^{-3})的区域面积为 36 228.0 km^2,约占汾渭平原总面积的 23.7%,主要分布于秦岭、吕梁山和太行山等地形起伏度较高的地区,其余地区 $PM_{2.5}$年均浓度多超标.沿汾河、渭河已形成一条连续的 $PM_{2.5}$带状污染区,年均浓度多超过 55 μg·m^{-3},其中西安、咸阳至临汾间的冲积平原和洛阳盆地污染最严重,年均浓度多超过 60 μg·m^{-3},中心城区则多超过 70 μg·m^{-3},以西安、咸阳、渭南、临汾和洛阳的分布面积最广且浓度最高.$PM_{2.5}$浓度全局 Moran's I 为 0.995,表明 $PM_{2.5}$浓度分布具有极显著的正的空间自相关性,相似值趋于集聚.局部空间自相关分析结果显示[图 5(b)],中部平原由咸阳至临汾的广大区域主要为高高集聚,此外洛阳盆地也主要呈高高集聚分布,进一

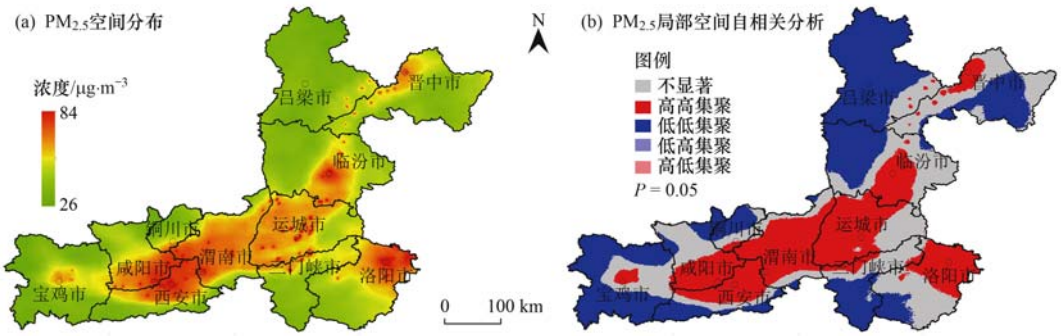


图 5 汾渭平原 $PM_{2.5}$浓度空间分布和局部空间自相关分析

Fig. 5 Distribution and local spatial autocorrelation analysis of $PM_{2.5}$ on the Fen-Wei Plain

步证实这些地区已形成了连片的 $PM_{2.5}$ 高污染区. 四周的山地和丘陵主要呈低低集聚，表明这些区域 $PM_{2.5}$ 浓度确实相对较低.

2.3　地形对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响

地形起伏度与 $PM_{2.5}$ 年均浓度的拟合结果表明[图6(a)]，地形起伏度对 $PM_{2.5}$ 有显著的负向影响，随地形起伏度的增加 $PM_{2.5}$ 浓度呈对数关系递减，拟合度达 0.679. 说明在地形起伏度较低时，$PM_{2.5}$ 对海拔和地形起伏度变化较敏感，而随着海拔和地形起伏的持续上升，$PM_{2.5}$ 下降的速度快速降低. 统计显示，地形起伏度为 0.1 ~ 0.8 的低起伏度地区，$PM_{2.5}$ 平均浓度为 57.6 $\mu g \cdot m^{-3}$，其中地形起伏度 < 0.2 时，$PM_{2.5}$ 平均浓度达 68.7 $\mu g \cdot m^{-3}$. 地形起伏度为 0.8 ~ 2.2 的中起伏度地区，$PM_{2.5}$ 平均浓度为 40.2 $\mu g \cdot m^{-3}$. 地形起伏度 > 2.2 的高起伏度地区，$PM_{2.5}$ 平均浓度为 35.2 $\mu g \cdot m^{-3}$，其中地形起伏度 > 2.4 时，$PM_{2.5}$ 均低于二级标准限值(35 $\mu g \cdot m^{-3}$). 用双变量空间自相关分析方法分别分析地形起伏度与 $PM_{2.5}$ 浓度的空间自相关性，全局 Moran' I 为 −0.741，进一步证实两者间的空间分布有显著的负相关关系，两者主要呈高低和低高集聚分布，即地形起伏度低和 $PM_{2.5}$ 浓度高的栅格、地形起伏度高和 $PM_{2.5}$ 浓度低的栅格的空间分布趋于集聚分布. 进一步采用双变量局部空间自相关分析识别两者空间集聚的具体区域[图6(b)]，低高集聚主要出现在汾河和渭河的沿河冲积平原，尤其是咸阳和西安至临汾之间的区域，此外洛阳盆地也有较大面积分布，高低集聚主要出现在吕梁山、秦岭和太行山等高大山脉及黄土高原部分地形起伏度较大的区域. 然而，在汾河和渭河冲积平原低高集聚区域内，偶尔有高高集聚的现象发生. 可能原因在于，冲积平原内部也存在一些起伏度较高的山体，虽然人类活动强度小、污染物排放量小，但受大气传输的影响，其 $PM_{2.5}$ 浓度也较高. 在部分河流的沿岸，还出现了低低集聚现象. 可能原因在于，这些河流下切深度较大，沿岸平缓台地的面积小，不适合人口大规模聚居，污染物排放量小，$PM_{2.5}$ 浓度较低.

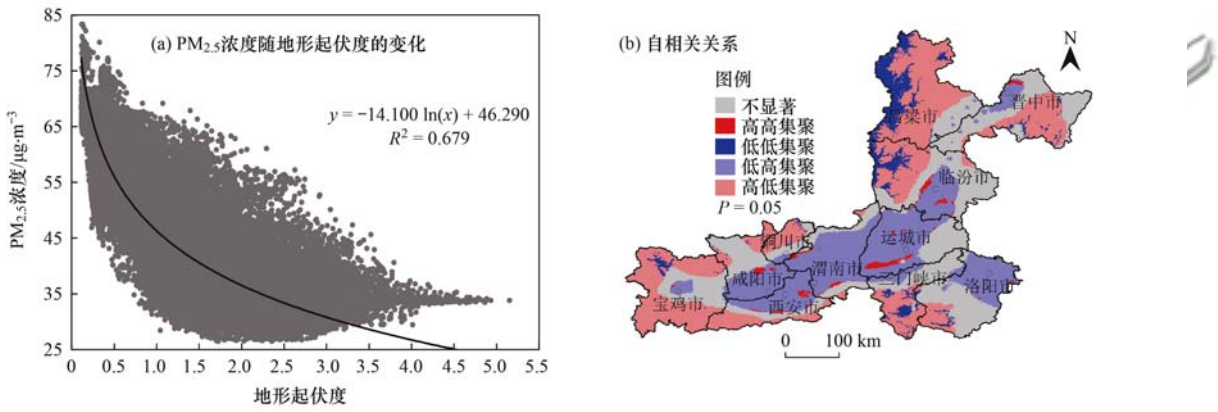


图6　$PM_{2.5}$ 和地形起伏度的关系

Fig. 6　Relationship between $PM_{2.5}$ and RDLS

2.4　地形对 $PM_{2.5}$ 的影响机制

一般来说，地形主要通过影响人口、产业布局和局地气象条件等因素间接地对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布产生影响. 因此，本文首先从人为和自然两方面构建指标，通过地理探测器探测汾渭平原 $PM_{2.5}$ 空间分布的影响因素，再通过回归分析和双变量空间自相关分析研究地形对这些因素的影响，来探讨地形对 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的影响机制.

2.4.1　$PM_{2.5}$ 分布的影响因素

参考已有研究，并结合数据可获取性原则，本文选取了人口、GDP、能源消费指数、年均气温、降水量、相对湿度、平均风速和植被指数为探测因子. 由于网格数量太多，地理探测器软件无法计算，本文随机抽取其中30 000个网格用于影响因素的分析(表1).

表1　地理探测结果[1)]

Table 1　Results of the geographical detector

影响因子	人口	GDP	能源消费指数	气温	降水量	相对湿度	风速	植被指数
q	0.595	0.462	0.124	0.643	0.232	0.197	0.292	0.191
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
影响方向	+	+	+	+	−	−	−	−

1) + 表示正向影响，− 表示负向影响

表 1 显示,所选探测因子均在 0.001 水平下显著,对 $PM_{2.5}$ 分布均有显著影响. 人为因素方面,人口、GDP 和灯光指数均呈正向影响,表明人口越多、GDP 越高和能源消耗越大的地区 $PM_{2.5}$ 浓度越高,评价结果符合理论预期. 因为 $PM_{2.5}$ 主要来源于人为排放[1],$PM_{2.5}$ 浓度与人类活动密切相关. 其中人口密度的影响力最大,q 值为 0.595; GDP 的影响力其次,q 值为 0.462; 能源消费指数的影响力最小,q 值为 0.124. 自然因素中,除气温呈正向影响外,其余因子均呈负向. 其中气温的影响力最大,q 值为 0.643; 风速和降水的影响力其次,q 值分别为 0.292 和 0.232; 相对湿度和 NDVI 影响力最小,q 值分别为 0.197 和 0.124. 降水对 $PM_{2.5}$ 有显著的冲刷作用,是 $PM_{2.5}$ 的重要清除因子[31]; 风对污染物的扩散有重要作用,风速越大扩散能力越强[32]; 植被一方面对 $PM_{2.5}$ 有吸收和沉降的作用,另一方面能减少地面扬尘[11]. 因此,降水、风速和植被覆盖度一般与 $PM_{2.5}$ 呈负相关关系,评价结果符合理论预期. 但气温呈正向影响,显然不符合理论预期. 一般认为,气温是影响大气污染物扩散的重要因素[6,33],气温高时大气边界层相对较高,空气对流活动相对活跃,利于污染物的扩散[34]; 气温低时大气边界层相对较低,空气相对稳定,利于污染物的累积[34]. 这是冬季 $PM_{2.5}$ 污染普遍比夏季严重的重要原因,在长三角地区的研究中也得到证实[7]. 此外,相对湿度呈负向影响,也不符合理论预期. 已有研究表明,相对湿度高有利于大气气溶胶粒子通过吸湿增长、活化为云雾的凝结核或使气溶胶液相和非均相反应加强等方式引起 $PM_{2.5}$ 浓度上升[35,36],因而相对湿度一般与 $PM_{2.5}$ 浓度有正相关关系. 尽管相对湿度过大可能利于 $PM_{2.5}$ 沉降[37],但汾渭平原位居我国中部,相对湿度并不高,年均值在 59%~70% 之间,远未达到起正相关作用的阈值标准[37]. 气温和相对湿度的探测结果预期不符,可能与地形的干扰有关,并非其真实作用的反映(具体原因将在后述讨论). 因此,总体上看,人为因素的影响明显大于自然因素,尤其是人口和 GDP 的 q 值显著大于自然因素. 统计显示,$PM_{2.5}$ 年均浓度为良的地区($\leqslant 35\ \mu g\cdot m^{-3}$),人口平均密度为 115 人·$km^{-2}$, GDP 密度为 298 万元·$km^{-2}$. $PM_{2.5}$ 年均浓度超标的地区($>35\ \mu g\cdot m^{-3}$),人口平均密度为 391 人·km^{-2}, GDP 密度为 1 641 万元·km^{-2}, 其中 $PM_{2.5}$ 年均浓度 $>65\ \mu g\cdot m^{-3}$ 的地区,人口平均密度达 1 635 人·km^{-2}, GDP 密度达10 538万元·km^{-2}. 可见,汾渭平原 $PM_{2.5}$ 浓度总体分布格局主要由人口和 GDP 等人为因素决定,气象条件等自然因素则对 $PM_{2.5}$ 分布有一定的调节作用.

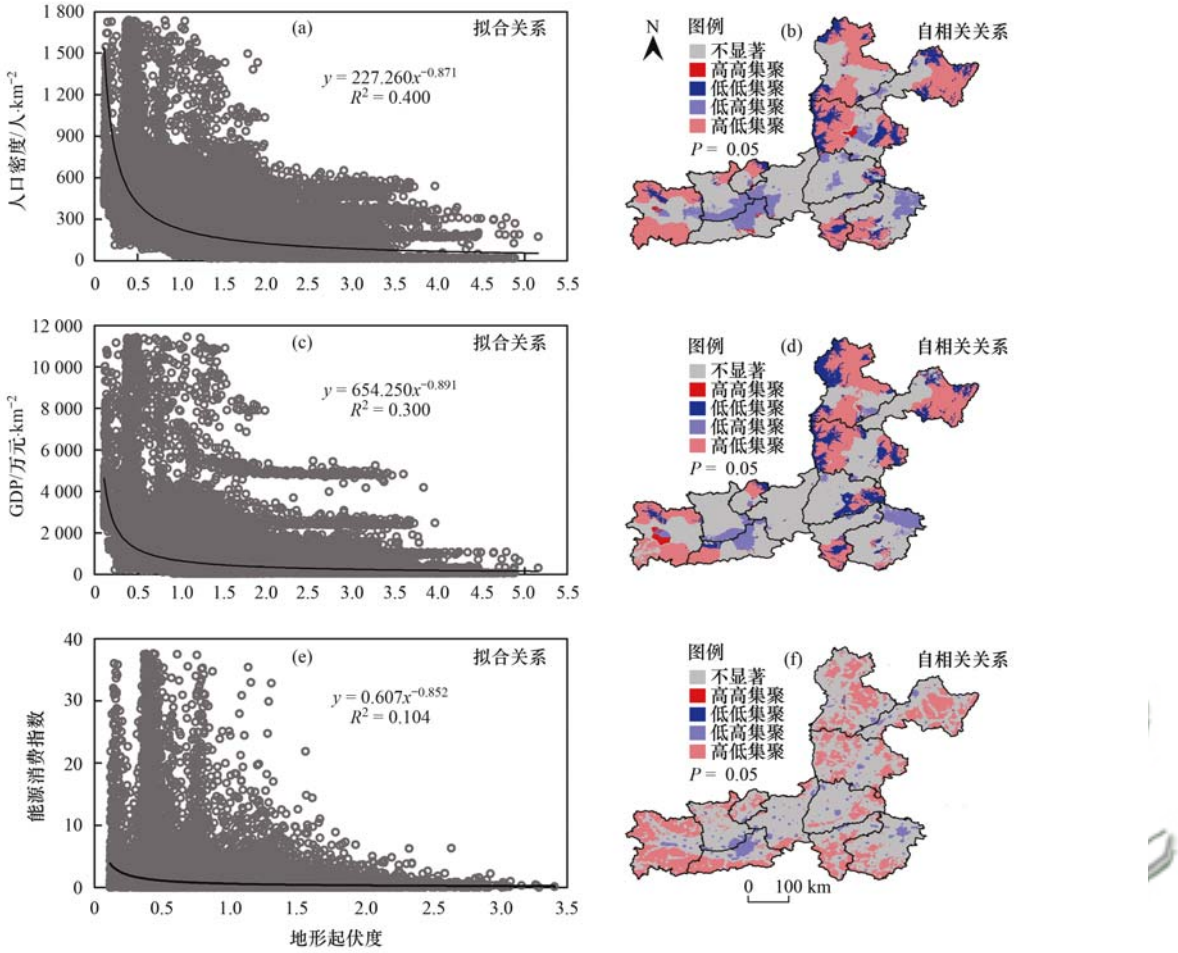
2.4.2 地形对人为因素的影响

地形起伏度与人口、GDP 和能源消费指数的拟合结果显示(图 7),人口、GDP 和能源消费随地形起伏度的增加均呈幂函数关系递减,拟合度分别为 0.400、0.300 和 0.104(为减小极端值的影响,拟合前对数据进行了 1% 和 99% 的缩尾处理,其中能源消费指数仅拟合大于 0 值的网格). 在地形起伏度较小时,人口、GDP 和灯光指数随地形起伏度的增大而快速递减,随着地形起伏度的继续增大,人口、GDP 和灯光指数变化趋于平缓,变化的拐点在 0.5 附近. 统计显示,地形起伏度 <0.5 的区域面积约占总面积的 14.8%,却居住了 38.4% 的人口,贡献了 49.2% 的 GDP,消耗了 62.0% 的能源. 地形起伏度累积至 1.0 时,面积占区域总面积的 33.9%,人口、GDP 和能源消耗的占比则分别达到 64.1%、69.6% 和 86.4%. 相反,地形起伏度 >1.5 区域面积占总面积的 33.6%,只居住了 16.4% 的人口,贡献 13.8% 的 GDP,消耗 2.4% 的能源. 这种曲线形态与地形起伏度和 $PM_{2.5}$ 的曲线形态(图 6)较为类似,可见地形起伏度通过对人类活动强度的影响基本决定了 $PM_{2.5}$ 的总体分布格局.

为进一步证实地形对人口、GDP 和能源消费分布的影响,利用双变量空间自相关分析分别识别地形起伏度与人口、GDP 和能源消费指数的空间分布模式(图 7). 结果显示,全局莫兰指数分别为 −0.274、−0.157 和 −0.203,且通过了信度为 99% 的显著性检验,表明汾渭平原地形起伏度与人口、GDP 和能源消费指数均有显著的负空间自相关关系,人口、GDP 和能源消费指数主要集中在地形起伏度低的地区,尤其是汾河平原、渭河平原和洛阳盆地的城镇地区低高集聚最明显,四周的丘陵、山地则主要为高低集聚,与地形起伏度和 $PM_{2.5}$ 的集聚模式(图 6)有较高重合度.

2.4.3 地形对自然因素的影响

地形对气温、降水、相对湿度、风速和植被指数等自然因素都有显著影响,不仅拟合关系显著,而且双变量自相关分析也都通过了显著性检验,说明空间分布上也显著相关(图 8). 从拟合关系上看,除与植被指数呈对数拟合关系外,其余均为线性拟合关系; 从影响方向上看,除与气温呈负相关关系外,其余均为正相关关系. 其中,地形对气温的影响最大,拟合度最高($R^2=0.741$),全局 Moran's I 最大(−0.838). 汾渭平原的纬度范围为 38°43′48″N ~ 33°34′22″N,南北间最大纬差为 5°09′26″,因纬度不

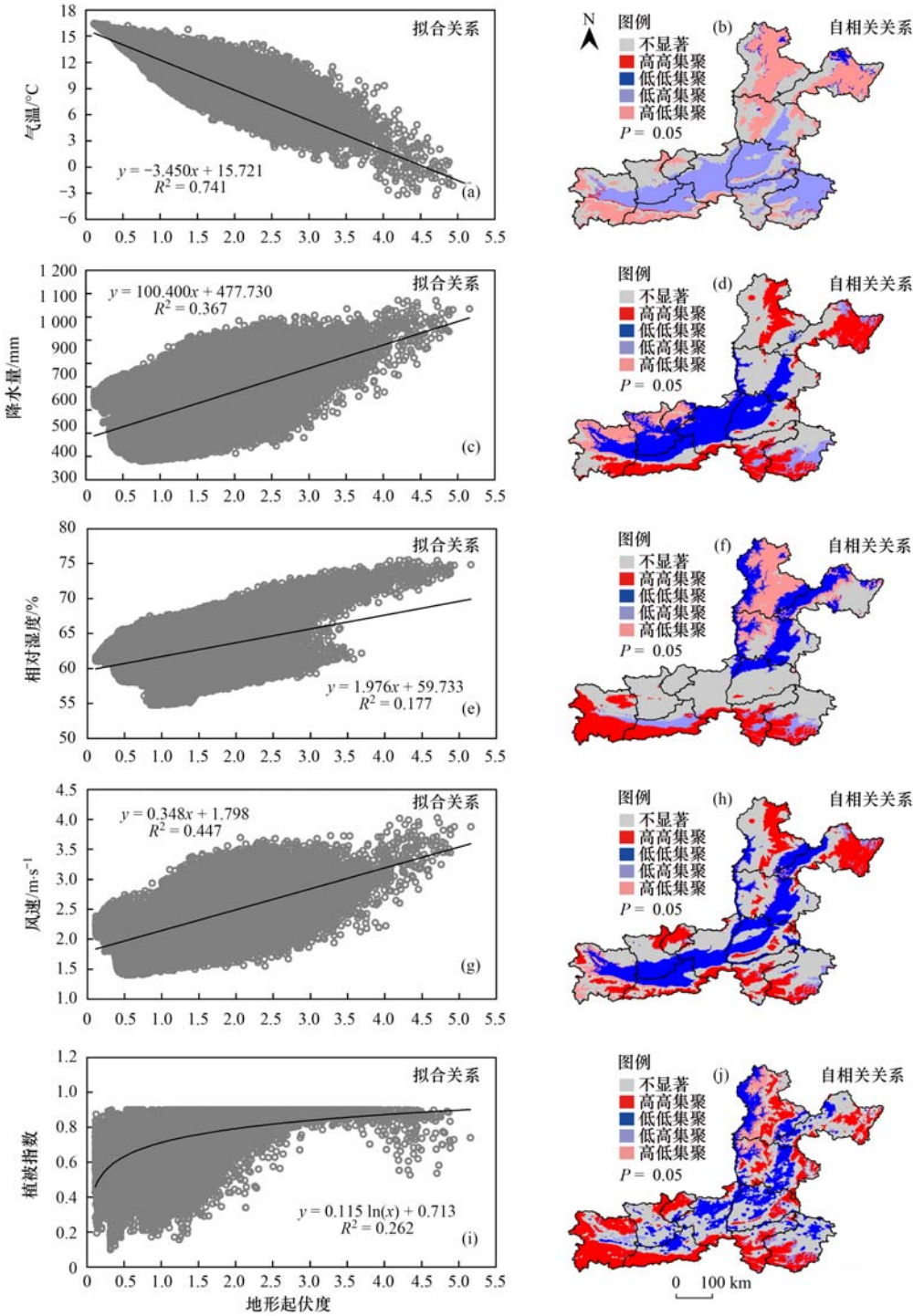


(a)和(b)地形对人口的影响,(c)和(d)地形对 GDP 的影响,(e)和(f)地形对能源消费的影响

图 7　地形对人为因素的影响

Fig. 7　Influence of topography on human factors

同而引起的气温差异并不大,从最靠近南北两端且海拔相近的兴县气象站(111°07′48″E, 38°28′12″N, 1 012.6 m)和留坝气象站(106°55′48″E, 33°37′48″N, 1 032.1 m)来看,两者近 3 年年均气温相差约 2.2℃. 而由地形差异引起的温度差异却很大,汾渭平原的海拔变化范围为 106 ~ 3 747 m,高差为 3 459 m,理论上对流层每上升 100 m 气温约下降 0.6℃,因此由地形引起的温度理论上最高可达 21.9℃. 气温的插值结果也表明,汾渭平原的温差达 19.7℃. 可见,汾渭平原地表间的温差主要由地形差异引起. 地形差异造成汾河平原、渭河平原和洛阳盆地的气温普遍高于四周山区,使汾渭平原的气温和人为因素造成的污染物排放量在空间分布上具有正相关性. 尽管理论上气温高更利于污染物扩散,但无法改变 $PM_{2.5}$ 的总体分布格局,使气温的影响被抵消而呈正向,并非其真实作用的反映. 此外,白天山区的加热效应还可能使同层大气的温度高于平原,易形成大气逆温层,抑制污染物的湍流输送[14],反而加重平原地区的污染程度. 地形对风速的影响其次,R^2 为 0.447,全局 Moran's I 为 0.643. 由于地形的阻挡作用,中部平原的风速普遍小于四周山区,近 3 年中部平原 13 个气象站的年均风速为 1.3 ~ 2.5 m·s^{-1},平均为 1.9 m·s^{-1},明显低于四周山区 2.3 m·s^{-1}的平均风速. 由于风对污染物有显著的扩散作用,因此地形的阻挡作用在一定程度加大了中部平原 $PM_{2.5}$ 的污染程度,加剧其中部平原高、四周山地低的分布格局. 气象因素中,地形对降水和相对湿度的影响最小,R^2 分别为 0.367 和 0.177,全局 Moran's I 分别为 0.589 和 0.410. 汾渭平原的降水主要来自夏季的东南季风,由于地形的阻挡作用,东部山区的迎风坡易形成地形雨,降水量相对较大,相对湿度也相对较高; 受焚风效应的影响,东部山区背风坡和平原地区降水量和相对湿度相对较小; 在地形的作用下,西部山区迎风坡也易成云致雨,降水量和相对湿度也比平原地区大. 因此,在地形的作用下,汾渭平原降水量和相对湿度总体上呈: 东部山区 > 西部山区 > 中部平原. 由于降水对污染物有清除作用,因此地形引起的四周山地高、中部平原低



(a)和(b)地形对气温的影响,(c)和(d)地形对降水影响,(e)和(f)地形对相对湿度的影响,(g)和(h)地形对风速的影响,(i)和(j)地形对植被的影响

图 8 地形对自然因素的影响

Fig. 8 Influence of topography on natural factors

的降水分布格局也在一定程度上加剧了汾渭平原 $PM_{2.5}$ 中部平原高、四周山地低的分布格局. 相对湿度虽与 $PM_{2.5}$ 浓度一般呈正相关关系,但其空间分布与人为因素造成的污染物排放量在空间分布上具有负相关性,相对湿度的正相关系并不能改变 $PM_{2.5}$ 的总体分布格局,致使其影响被抵消而呈负向,并非其真实作用的反映. 与气象因素不同,地形与植被指数的拟合关系为对数,R^2 和全局 Moran's I 分别为 0.262 和 0.564. 由于降水量大和人类活动强度相对较低,地形起伏度高的地区植被指数相对较好,利于减少扬尘,也有助于 $PM_{2.5}$ 的沉降,因此植被指数的分布特征在一定程度上也加剧了 $PM_{2.5}$ 中部高、四周低的分布格局. 可见,汾渭平原的特殊地形使中部平原的风速、降水量和植被指数相对降低,且更容

易造成逆温层，不利于 $PM_{2.5}$ 的清除和扩散，加重了 $PM_{2.5}$ 的污染程度.

3　结论

(1)汾渭平原地形起伏度总体具有中部低、四周高的分布特征，与海拔高度有显著的正相关关系. 中部为河流冲积平原，地形起伏度低，多在 0.8 以下；四周为黄土高原丘陵、山地和高大山系，地形起伏度高，多在 0.8 以上，其中秦岭、吕梁山、太岳山和太行山等高大山系多大于 2.2.

(2)$PM_{2.5}$ 与地形起伏度有显著的负空间自相关关系，大体随地形起伏度的增加呈对数关系递减，总体具有中部高、四周低的分布特征. 西安和咸阳至临汾间的冲积平原和洛阳盆地污染最严重，年均浓度多超过 60 $\mu g \cdot m^{-3}$，秦岭、吕梁山和太行山等高大山系多低于 35 $\mu g \cdot m^{-3}$.

(3)地理探测器分析表明，汾渭平原 $PM_{2.5}$ 浓度总体分布格局主要由人口和 GDP 等人为因素决定，q 值远大于自然因素，分别 0.595 和 0.462. 降水、风速和植被的 q 值相对较小，分别为 0.232、0.292 和 0.191，对 $PM_{2.5}$ 分布有一定的调节作用. 气温和相对湿度则因空间分布与人为因素呈正相关关系，其影响方向受人为因素的控制，并非其真实作用的反映.

(4)地形一方面通过制约人口、GDP 和能源消费等人为因素的分布决定了汾渭平原 $PM_{2.5}$ 的整体分布格局，另一方面使中部平原的风速、降水量和植被指数相对降低，且更容易造成逆温层，不利于 $PM_{2.5}$ 的清除和扩散，加重了中部平原 $PM_{2.5}$ 的污染程度.

参考文献：

[1] Liu H M, Fang C L, Zhang X L, *et al*. The effect of natural and anthropogenic factors on haze pollution in Chinese cities: a spatial econometrics approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **165**: 323-333.

[2] Guerra S A, Olsen S R, Anderson J J. Evaluation of the SO_2 and NO_x offset ratio method to account for secondary $PM_{2.5}$ formation [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2014, **64**(3): 265-271.

[3] Wang H L, Qiao L P, Lou S R, *et al*. Chemical composition of $PM_{2.5}$ and meteorological impact among three years in urban Shanghai, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **112**: 1302-1311.

[4] Jin J Q, Du Y, Xu L J, *et al*. Using Bayesian spatio-temporal model to determine the socio-economic and meteorological factors influencing ambient $PM_{2.5}$ levels in 109 Chinese cities [J]. Environmental Pollution, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113023.

[5] Wang P F, Guo H, Hu J L, *et al*. Responses of $PM_{2.5}$ and O_3 concentrations to changes of meteorology and emissions in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **662**: 297-306.

[6] 黄小刚，赵景波，曹军骥，等. 长江经济带 $PM_{2.5}$ 分布格局演变及其影响因素[J]. 环境科学，2020，**41**(3)：1013-1024.
Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al*. Evolution of the distribution of $PM_{2.5}$ concentration in the Yangtze River economic belt and its influencing factors [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1013-1024.

[7] 黄小刚，赵景波，辛未冬. 基于网格的长三角 $PM_{2.5}$ 分布影响因素及交互效应[J]. 环境科学，2021，**42**(7)：3107-3117.
Huang X G, Zhao J B, Xin W D. Factors and their interaction effects on the distribution of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Delta based on grids [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3107-3117.

[8] Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al*. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of $PM_{2.5}$ in China between 2000 and 2015 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, **29**(2): 253-270.

[9] 段杰雄，翟卫欣，程承旗，等. 中国 $PM_{2.5}$ 污染空间分布的社会经济影响因素分析[J]. 环境科学，2018，**39**(5)：2498-2504.
Duan J X, Zhai W X, Cheng C Q, *et al*. Socio-economic factors influencing the spatial distribution of $PM_{2.5}$ concentrations in China: an exploratory analysis [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2498-2504.

[10] 贺祥，林振山，刘会玉，等. 基于灰色关联模型对江苏省 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素的分析[J]. 地理学报，2016，**71**(7)：1119-1129.
He X, Lin Z S, Liu H Y, *et al*. Analysis of the driving factors of $PM_{2.5}$ in Jiangsu province based on grey correlation model [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(7): 1119-1129.

[11] 黄小刚，邵天杰，赵景波，等. 汾渭平原 $PM_{2.5}$ 浓度的影响因素及空间溢出效应[J]. 中国环境科学，2019，**39**(8)：3539-3548.
Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al*. Influence factors and spillover effect of $PM_{2.5}$ concentration on Fen-wei Plain [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(8): 3539-3548.

[12] Zhang J J, Zhu W B, Zhu L Q, *et al*. Topographical relief characteristics and its impact on population and economy: a case study of the mountainous area in western Henan, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, **29**(4): 598-612.

[13] Fang Y P, Ying B. Spatial distribution of mountainous regions and classifications of economic development in China [J]. Journal of Mountain Science, 2016, **13**(6): 1120-1138.

[14] 杨雪玲，王颖，李博，等. 河谷地形气象要素对污染物浓度的影响[J]. 环境科学研究，2018，**31**(1)：34-41.
Yang X L, Wang Y, Li B, *et al*. Influence of meteorological elements on pollutant concentration in river valley terrain [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(1): 34-41.

[15] 刘丽，王体健，王勤耕. 区域复杂地形大气污染扩散的模拟研究[J]. 高原气象，2008，**27**(5)：1074-1082.
Liu L, Wang T J, Wang Q G. Modeling on the regional air pollutant dispersion over complex terrain [J]. Plateau Meteorology, 2008, **27**(5): 1074-1082.

[16] 张强. 地形和逆温层对兰州市污染物输送的影响[J]. 中国环境科学，2001，**21**(3)：230-234.
Zhang Q. The influence of terrain and inversion layer on pollutant transfer over Lanzhou City [J]. China Environmental Science, 2001, **21**(3): 230-234.

[17] 汤宇磊，杨复沫，詹宇. 四川盆地 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 高分辨率时空分布及关联分析[J]. 中国环境科学，2019，**39**(12)：4950-4958.

Tang Y L, Yang F M, Zhan Y. High resolution spatiotemporal distributionand correlation analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in the Sichuan Basin[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(12): 4950-4958.

[18] 徐丹妮, 王瑾婷, 袁自冰, 等. 汾渭平原复杂地形影响下冬季 $PM_{2.5}$ 污染分布特征、来源及成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1184-1198.
Xu D N, Wang J T, Yuan Z B, *et al*. Temporal-spatial variations, source apportionment, and formation mechanisms of $PM_{2.5}$ pollution over Fenwei Plain, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(4): 1184-1198.

[19] 李雁宇, 李杰, 曾胜兰, 等. 2017 年汾渭平原东部大气颗粒物污染特征分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(1): 63-72.
Li Y Y, Li J, Zeng S L, *et al*. Analysis of atmospheric particulates in the eastern Fenwei Plain in 2017[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(1): 63-72.

[20] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al*. Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(7): 3762-3772.

[21] He C Y, Gao B, Huang Q X, *et al*. Environmental degradation in the urban areas of China: evidence from multi-source remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, **193**: 65-75.

[22] Xie Y H, Weng Q H. World energy consumption pattern as revealed by DMSP-OLS nighttime light imagery[J]. GIScience & Remote Sensing, 2016, **53**(2): 265-282.

[23] 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 等. DMSP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学学报, 2015, **17**(9): 1092-1102.
Cao Z Y, Wu Z F, Kuang Y Q, *et al*. Correction of DMSP/OLS night-time light images and its application in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, **17**(9): 1092-1102.

[24] 柏中强, 王卷乐, 杨雅萍, 等. 基于乡镇尺度的中国 25 省区人口分布特征及影响因素[J]. 地理学报, 2015, **70**(8): 1229-1242.
Bai Z Q, Wang J L, Yang Y P, *et al*. Characterizing spatial patterns of population distribution at township level across the 25 provinces in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(8): 1229-1242.

[25] 徐汉明, 刘振东. 中国地势起伏度研究[J]. 测绘学报, 1991, **20**(4): 311-319.
Xu H M, Liu Z D. Study on relief amplitude in China[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1991, **20**(4): 311-319.

[26] 韩海辉, 高婷, 易欢, 等. 基于变点分析法提取地势起伏度——以青藏高原为例[J]. 地理科学, 2012, **32**(1): 101-104.
Han H H, Gao T, Yi H, *et al*. Extraction of relief amplitude based on change point method: a case study on the Tibetan Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, **32**(1): 101-104.

[27] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究[J]. 地理科学, 2005, **25**(4): 393-400.
Meng B, Wang J F, Zhang W Z, *et al*. Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, **25**(4): 393-400.

[28] 周侃, 樊杰. 中国环境污染源的区域差异及其社会经济影响因素——基于 339 个地级行政单元截面数据的实证分析[J]. 地理学报, 2016, **71**(11): 1911-1925.
Zhou K, Fan J. Regional disparity of environmental pollution source and its socio-economic influencing factors: based on the cross-section data of 339 cities at prefecture level or above in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(11): 1911-1925.

[29] Anselin L, Syabri I, Smirnov O. Visualizing multivariate spatial correlation with dynamically linked windows[A]. In: Anselin L, Rey S(Eds.). New Tools for Spatial Data Analysis: Proceedings of the Specialist Meeting[M]. Santa Barbara: University of California, 2002.

[30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 116-134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1): 116-134.

[31] Xu D H, Ge B Z, Wang Z F, *et al*. Below-cloud wet scavenging of soluble inorganic ions by rain in Beijing during the summer of 2014[J]. Environmental Pollution, 2017, **230**: 963-973.

[32] Xu J M, Chang L Y, Qu Y H, *et al*. The meteorological modulation on $PM_{2.5}$ interannual oscillation during 2013 to 2015 in Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **572**: 1138-1149.

[33] Zhang Z Y, Zhang X L, Gong D Y, *et al*. Evolution of surface O_3 and $PM_{2.5}$ concentrations and their relationships with meteorological conditions over the last decade in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2015, **108**: 67-75.

[34] Li Z Q, Guo J P, Ding A J, *et al*. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality[J]. National Science Review, 2017, **4**(6): 810-833.

[35] 宋明, 韩素芹, 张敏, 等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 的关系[J]. 气象与环境学报, 2013, **29**(2): 34-41.
Song M, Han S Q, Zhang M, *et al*. Relationship between visibility and relative humidity, PM_{10}, $PM_{2.5}$ in Tianjin[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, **29**(2): 34-41.

[36] Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, *et al*. The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on $PM_{2.5}$ mass reduction in key regions in China[J]. Science China Earth Sciences, 2019, **62**(12): 1885-1902.

[37] 王祎頔, 王真祥. 上海市 $PM_{2.5}$ 浓度变化特征及其气象因子分析[J]. 干旱区地理, 2018, **41**(5): 1088-1096.
Wang Y D, Wang Z X. Characteristics of $PM_{2.5}$ concentration variability and its meteorological factors in Shanghai[J]. Arid Land Geography, 2018, **41**(5): 1088-1096.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 10

Oct. 15, 2021

CONTENTS

Continuous $PM_{2.5}$ Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events ····· CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, *et al.* (4575)

Orographic Influences on the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ on the Fen-Wei Plain ····· HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, *et al.* (4582)

Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province ····· LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, *et al.* (4593)

Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China ····· HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, *et al.* (4602)

Characteristics of O_3 Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring ····· HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, *et al.* (4611)

O_3 Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations ····· HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, *et al.* (4621)

Characteristics and Source of VOCs During O_3 Pollution Between August to September, Langfang Development Zones ····· ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, *et al.* (4632)

Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province ····· ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, *et al.* (4641)

Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay ····· XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, *et al.* (4650)

Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution ····· WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, *et al.* (4660)

Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter ····· ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, *et al.* (4669)

Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants ····· YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)

Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin ····· WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, *et al.* (4687)

Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China ····· LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, *et al.* (4698)

Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA ····· LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, *et al.* (4708)

Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China ····· REN Bing-nan, GENG Jing (4717)

Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake ····· GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, *et al.* (4727)

Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China ····· YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, *et al.* (4739)

Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China ····· ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, *et al.* (4753)

Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO_3-Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta ····· LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, *et al.* (4761)

Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area ····· WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, *et al.* (4772)

Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria ····· ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, *et al.* (4781)

Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co^{2+} System: Influencing Factors and Mechanisms ····· WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, *et al.* (4789)

Degradation 2,2′,4,4′-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α-MnO_2 ····· LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, *et al.* (4798)

Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate ····· ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)

Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar ····· WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)

Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process ····· LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, *et al.* (4826)

Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China ····· GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, *et al.* (4834)

Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types ····· YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)

Partial Nitritation and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage ····· QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, *et al.* (4853)

Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitratation Granular Sludge ····· ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)

Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China ····· ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, *et al.* (4872)

Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin ····· CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, *et al.* (4880)

Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area ····· LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, *et al.* (4889)

Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi ····· LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, *et al.* (4897)

Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil ····· DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, *et al.* (4908)

Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province ····· YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, *et al.* (4916)

Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches ····· MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan ····· ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, *et al.* (4933)

Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil ····· LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, *et al.* (4942)

Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China ····· LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, *et al.* (4951)

Denitrification Rates and *nirS*-type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau ····· LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, *et al.* (4959)

Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain ····· WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, *et al.* (4968)

Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvo-aquic Soil Under Different Rotation Fallow ····· NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, *et al.* (4977)

Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil ····· LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, *et al.* (4988)

Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of *Phragmites australis* and Their Limiting Factors in Iron Tailings ····· CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, *et al.* (4998)

Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils ····· ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, *et al.* (5010)

Response of Yield, CH, and N_2O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO_2 Concentrations ····· YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, *et al.* (5021)

Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars ····· YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, *et al.* (5030)

Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities ····· LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)

Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials ····· ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)